

# 製造工程と製品のグリーン化を実現するための レーザーを用いた材料プロセッシング技術の開発

— 光を用いたものづくり手法の確立と社会への貢献を目指して —

新納 弘之

レーザーを用いた材料プロセッシング技術は、高い加工精度を要求される産業分野で着実に応用の幅を広げている。ニーズ側からの高速化、微細化、高品位化等の加工要求は年々増大しており、レーザー加工への期待は大きい。レーザー加工機システムのハード面が進歩し、光照射による励起状態に続く多様な過程の現象理解が進むことで、局所場における高速・高品位な表面加工が実施できる状況が整いつつある。この論文では、光励起過程に基づくレーザープロセッシング技術を用いた局所場表面加工技術を主題とし、製造工程と製品のグリーン化を実現するためのシナリオならびにそれを達成する道筋、要素技術の選択と構成の考察を行った。さらに、実用化に向けた課題を整理した。

**キーワード:** 高出力レーザー、物質と光の相互作用、光励起過程、表面化学反応

## Green photonics for laser-based manufacturing

– Photonics contributes to a sustainable society in the “photon century” –

Hiroyuki NIINO

Green photonics is expected to reduce energy consumption and pollution associated with a broad range of manufacturing processes. The paper is a study on the development of laser-based methods and their applications. High precision surface processing of various materials is a key technology for practical industrial applications. Well-defined micro-fabrication with high-speed and high-quality treatment of materials was performed by laser irradiation. The technical challenges are particularly great in this area, but recent developments in laser processing have opened up new frontiers. Due to advances in laser processing systems, and greater understanding of the phenomenon of diverse excited states generated by laser irradiation, these methods can be considered mature and versatile techniques that present some key benefits over other more established fabrication techniques.

**Keywords:** High-power laser, laser-material interaction, photo-induced excitation, surface chemical reaction

### 1 はじめに

物質と光の相互作用解明は、古くから学問上の重要研究課題であり、現在もなお先端的テーマとして各国で精力的に研究が推進されている。ここで、物質への光子吸収過程に着目すると、光子吸収によって物質（原子や分子）には各種の励起状態が誘起されて、引き続き、緩和過程や化学結合開裂等が起こる。高振動励起状態からの緩和過程ではいわゆる光熱過程による高温度状態が発生し、電子励起状態からの化学結合開裂では光化学過程による分子の解離や化学結合の組換え等の化学反応が起こる。微細パターン状に結像させた光や微小スポット光を基材に照射することで、特定の場所への位置選択的な局所場処理

が容易にできることが、実用面での大きな特徴である。

この論文で主題とするレーザーを用いたプロセッシング技術（加工技術）では、高分子材料、ガラス・セラミック材料、金属材料、複合材料等さまざまな先進材料に高出力レーザーを照射することによって誘起される特徴的な光励起プロセスに基づいたレーザー局所場処理技術について言及する。レーザー励起プロセッシング技術を用いることによって、製造プロセスの省工程・省部品化を促進し、産業応用における低コスト化、高効率化、環境負荷低減に貢献することを目標とする。特に、難加工性材料等の高精度・高品位加工の実現によって新規な部材・部品・製品を提供し、製品としての省エネ特性を向上させることで社会に普

産業技術総合研究所 機能化学研究部門 〒305-8565 つくば市東 1-1-1 中央第5  
Research Institute for Sustainable Chemistry, AIST Tsukuba Central 5, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8565, Japan E-mail: niino.hiro@aist.go.jp

Original manuscript received January 6, 2015, Revisions received March 3, 2015, Accepted March 10, 2015



収帯波長に光照射することが基本的な操作である。

他方、光の集光密度を高めると、多数個の光子が物質と同時に吸収される現象が観測される。これは多光子吸収過程と呼ばれ、光強度のべき乗に比例して発生することから（非線形吸収過程）、フェムト秒やピコ秒パルス光の尖頭出力の高い超短パルスレーザーの照射によって顕著に発現する現象である。多光子吸収過程によって励起される準位は、同時に吸収された光子エネルギーの和なので、一光子吸収過程よりもより高い準位に励起することができる。つまり、波長 1000 nm 近傍の近赤外域の多光子励起で可視や紫外域のエネルギーに相当する励起準位まで遷移させることができる。有機・高分子材料やガラス材料は、紫外～可視域に強吸収帯を有し、近赤外域には吸収帯が存在しないものが多いので、近赤外域の超短パルスレーザー照射によって、焦点を結ぶ基材内部部位だけを効果的に多光子励起する照射方法も考案されている<sup>15)</sup>。

平均出力は、1 秒間に光源装置から発振する光子エネルギーの総和である。パルス動作の発振器では、一つのパルスの光エネルギーとパルス繰り返し速度の積が平均出力となる。平均出力は、プロセッシング全体の処理速度を決める因子で、特に高速処理が要求される応用分野では、大きな平均出力の光源装置を選択することになる。

ビーム品位に関して、レーザー光の動径方向のエネルギー強度がガウス分布である場合をシングルモードと呼び、マルチモード光に比べて小さな集光径を得ることができる。したがって、単一スポット光で照射を行う場合には、シングルモード光の高速走査が有効である。しかし、複雑な微細パターンをフォトレジストに転写する半導体リソグラフィ等の用途では、スペckルノイズ（散乱光中に見られる明暗の斑点模様のこと）で、レーザーがコヒーレントであるために生じる独特の現象）を抑制できる狭短域化したマルチモード光が縮小光学系の光源として使用されている。このように、特定部位の位置選択的な加工や分析等を行いたいときには、レーザーを活用することが効果的である。さらに、パルスレーザー装置では上記の特徴に加えて時間制御性も向上する。したがって、レーザーによって“空間”と“時間”の両制御因子を精密に取り扱うことが可能になり、極微小領域における材料制御技術ができるようになっていく。

表 2 に加工用途の高出力レーザー発振器の変遷を示す。レーザー発振器の最近の進歩として、高出力化、ビーム品質の向上、短パルス化の特性向上が目目される。これまでマクロ加工分野を牽引してきた炭酸ガスレーザーや YAG レーザーに匹敵する勢いで市場導入が進むファイバレーザー装置では 100 kW 級まで平均出力が向上してお

表 2 加工用途の高出力レーザー発振器の変遷

加工分野	主要な光源装置の変遷				
	1980	1990	2000	2010	2020
マクロ加工分野 ・板金加工 ・3D造形加工	炭酸ガスレーザー				
	YAGレーザー				
	ファイバレーザー				
	半導体レーザー				
ミクロ加工分野 ・半導体リソグラフィ ・透明体等の微細加工	エキシマレーザー				
	高調波レーザー				
	フェムト秒レーザー				
	ピコ秒レーザー				

注) 各装置の左端の位置は「加工用装置として実用化された年」に相当する。

り、プラグインの電力-光変換効率は 30 % にも達することから省エネ性能も高い。これは、半導体レーザー素子の高性能化によるところが大きく、直接照射用のスタック型半導体レーザー装置の高出力化（数 kW 級）も著しい。これらのレーザー装置は、切断・穴あけ・溶接・接合・表面改質・粉末立体造形等多岐にわたるさまざまな加工技術における高品位・高速加工を実現している。ミクロ加工分野においても、短波長レーザーや超短パルスレーザーの導入が進んでいる。

## 2.2 レーザー加工機システムの特徴

ものづくり分野におけるレーザープロセッシング技術の産業実用システムは、①光源装置、②照射光学系、③基材（製品）搬送系、④加工プロセッシング部（プロセッシング技術、モニタ部を含む）、の主要 4 要素から構成されており、加工性能を決定する中核要素技術は、①および④。製造技術としての生産性向上の要素技術は、②および③の位置づけである。実際の工作機械として平板基材用の 2D 加工装置だけでなく、立体成形物を対象とする 3D 加工システムも製造ラインに適用できる機種が開発されている。デジタル設計データを精密に加工物に反映させる技術は高度化しており、現在も進歩を続けている。

照射光学系および搬送系の進歩は、加工分解能や処理速度の向上と基材大型化への対応に貢献している。特徴的な事例として、液晶テレビや太陽電池の製造工程にレーザー処理の適用が進んでいる。液晶テレビでは、パネル製造時の欠陥ロットを救済し、歩留り向上を図るための TFT アレイの欠陥を修正するリペア装置が開発されており、太陽電池では透明電極膜、半導体膜、金属膜等の各種薄膜のパターニング装置が使用されている。これらは基材サイズが数メートル級に年々大型化するなかで、マイクロメートルの加工精度も要求されている。そのダイナミックレンジは 5～6 桁にもわたるので、最先端・メカトロニクス技術が導入されている。



また近年は、前記の各主要要素に多数取り付けられたセンサー類が通信機能を内蔵し、相互に情報を交換しながら各要素間の自動制御の最適化技術が、IT 技術ならびにロボット技術の進歩と連動して発展しつつある。製造タクトタイム（工程作業時間）の短縮化や工場全体の稼働率を高める効果が期待されており、米国の「IoT（Internet of Things）」ならびに独国の「Industry4.0」の取り組みが注目されている<sup>66)7)</sup>。製造業における IoT では、製造工程自体の高度化・最適化だけでなく、顧客ニーズや発注技術情報と直接連携することで、より緊密かつグローバルなものづくり体制が構築できるとされている。Industry4.0 もほぼ同じ概念と言えるが、その名称には、人類の歴史としての「第 4 次産業革命」という位置づけが意図されている。

## 2.3 競合する加工技術との比較

### 2.3.1 切削加工や穴あけ加工等の物理的なメカニズムで加工を行う場合

競合する機械加工技術と比較して、レーザー加工は切削工具を使用しない非接触型加工のため、磨耗・劣化による消耗部品が発生しない。また、加工反力がないため剛性の小さい基材も高精度加工が適用できる。大気中における伝送減衰が少なく、光源装置本体は大きな騒音や振動を発生しないことが挙げられる。また、連続波キロワット級のレーザーも光ファイバー導光で光源装置から加工機ヘッド部まで伝送できるようになっており、光源とヘッド部の接続が容易になっていることから、遠隔部や狭隘部への高速加工法に適用できるリモート加工（加工機ヘッド部と基材を遠距離に保持する方式）による切断加工や溶接技術が発展している。物理的なメカニズムでレーザー加工を行う場合、その機構は光熱過程を経た高温状態の発生を起点とすることが多い。したがって、光エネルギー注入量と熱拡散速度のバランスを最適化し、アシストガスを併用することが大きな特徴である。レーザー加工では数 cm までの厚みの基材に対して効果的に加工できるが、5 cm を超える板厚の切断加工は現状困難な状況である。

レーザー処理技術は中量～少量段階の生産技術として適用の幅を広げている。金型を用いた加工では数万個～数十万個単位のロットである大量生産工程に対しては作業効率化と採算性が見込めるが、レーザー加工では数百個～数千個の生産単位または開発試作段階におけるコストダウン技術として有望視されている。レーザーを使った直接描画によるフレキシブルな加工を行うことで、金型製作ならびに金型管理等のリスク要因がなくなり、小・中量多品種の迅速（納期短縮）かつ仕様変更柔軟性の高い精密加工工程の生産技術として普及が始まっている。

### 2.3.2 光化学表面改質等の化学的なメカニズムで加工を行う場合

光照射による電子励起状態からの化学結合開裂を応用すると、分子の解離や化学結合の組換え等の化学反応を高効率かつ高密度に誘起することができる。微細パターン状に結像させた光や微小スポット光を基材に照射すれば、特定の場所への位置選択的な局所場化学処理が容易にできることになる。物理的なレーザー加工によって基材の形状を変化させるだけでなく、化学的な表面特性を任意に変更することができる。光を用いた表面改質の特徴として、

- ・基材表面への改質層の直接形成、微細パターン状の改質
- ・試薬使用量の低減、無溶媒化プロセス
- ・大気中、または、大気圧下での処理

が挙げられる。光源装置としてランプを用いることで光反応を誘起することも可能である。レーザーを使用するメリットは、パターン形状の処理ができることと高強度光照射によって活性種が高密度に生成することである。材料の表面改質では、主なレーザー照射方法として図 2 に示す 4 つの方法が挙げられる。図 2 (a) は表面改質を行いたい基材の表面に直接レーザーを照射する方法である。基材内部や表面層に光反応性の分子や官能基が含まれていれば、レーザー照射によって表面層の分子や官能基が励起されて、これを起点にして表面反応が進行する。誘起される光反応の種類を注意深く選択することで、表面に官能基を付与することができ、重合反応や表面極性を変化させることができる。また、基材表面に親水層または疎水層の薄い膜をコーティングし、レーザー加工によってその薄膜層を除去して母材層を部分的に露出させることで、表面特性をパターン化することも可能である。

図 2 (b) は図 2 (a) の派生例で、レーザー照射雰囲気

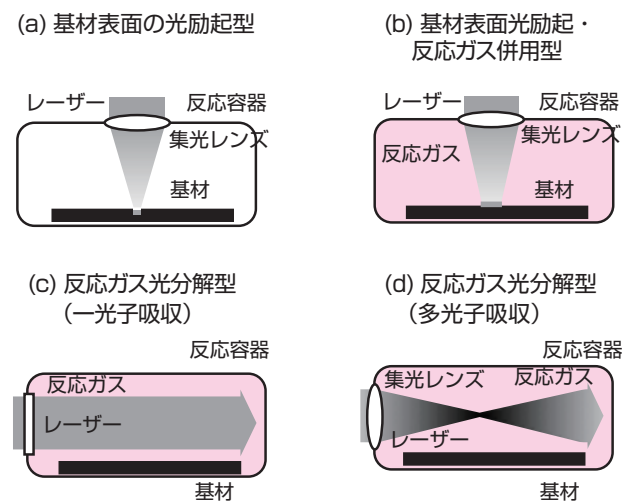


図2 レーザー照射による表面改質手法

表3 光反応を主体とする表面改質の種類と効果(応用例)

表面改質の種類	応用例
濡れ性改善	親和力・接着力向上、印刷適性、生体適合性向上、撥水性、防曇性
架橋、結晶化	表面硬化層形成、耐摩耗性
汚染層除去	表面洗浄
表面修飾 (グラフィ、コーティング)	高潤滑層形成、着色層形成、光反射(防止)膜、液晶配向膜、耐熱性、耐薬品性、ガスバリア性、帯電防止、耐候性、難燃性

に反応ガスを導入している。したがって、基材の表面反応を加速することができるとともに、意図的に基材表面層に光反応性分子を導入しなくても、最適な反応ガス種を選ぶことで目的の表面反応を行うことができる。この方法では基材と反応ガスの両方を同時に光励起することも可能で、図2(a)のようにパターン状の表面改質を行うことができる。

図2(c)や図2(d)では基材の光励起は行わず、反応ガスの光反応生成物を基材表面に堆積させることで、表面改質特性を得ているところに特徴がある。反応ガスが一光子吸収過程によって分解する場合には、図2(c)のように直入射照射で十分である。ガス分子の反応性が低いときや多光子吸収過程を必要とするときには、レーザーを反応容器内で集光することで、実効的な反応効率あげることができる。

表3に光反応を主体とする主要な表面改質の種類と応用例を示す。経時劣化が少なく耐久性の高い改質表面を作製するには、反応部位を材料最表面層だけでなく、母材特性を損なわない程度まで内部層も改質した方が多い。特に、高分子材料のように分子主鎖構造が柔軟で分子運動しやすい系では、最表面層の親水基が内部層に拡散し、表面の親水性が処理後徐々に低下することがあるため、1 μm前後の厚さの表面層を親水化すると耐久性の高い改質処理を行うことができる。

### 3 具体的な研究事例の紹介

第3章においては、第2章記述の現状のレーザー加工機システムをベース技術として、さらなる応用展開や適用拡大を指向した具体的な研究事例を3点紹介する。いずれも通常のレーザー加工法や他の競合加工技術では、高速・高品位な加工が困難な例である。

#### 3.1 複合材料の高速・高品位加工

近年、地球温暖化対策としてCO<sub>2</sub>削減ならびに省エネルギー化の推進が求められており、自動車や航空機等の輸

送機器の軽量化・低燃費化が進展している。その抜本的な軽量化候補構造材料として、アルミニウム等の金属に比べて比強度や比弾性に優れる炭素繊維強化樹脂(Carbon Fiber Reinforced Plastic: CFRP)が挙げられる。輸送機器においては、CFRPを用いた自動車・航空機のCO<sub>2</sub>削減効果に関心が集まっており、同材料を用いた開発製品を広範囲に普及させることが、社会全体の省エネを推進するための効果的な手段と考えられる。しかし、CFRPは異種難削材として知られ、革新的な製造技術として高精度な切断・接合技術の開発が要望されており、さらに製品製造タクトタイムの一層の短縮化が喫緊の課題となっている。産業の製造工程への応用展開を考えた時、製造リードタイムから帰着されるタクトタイムの値によって目標とされる加工速度が設定される。量産型の普通自動車製造を例にとると、タクトタイムは概ね1分であるので、個別部品の各々の大きさが要求する加工領域を基に大型部品であるルーフやフード(ボンネット)の外周トリミングでは、6 m/分程度の加工速度が必要となることが理解できる。そこで、CFRP材料のレーザー高速加工について、産業応用展開に向けた取り組みを行った(図3)<sup>[8]</sup>。

航空機製造の現場で実際に使用され、競合技術に位置づけられる機械加工ならびにウォータージェット加工とレーザー加工を比較するために、2 mm厚のCFRP基材に対する加工速度を測定したところ、それぞれ0.1 m/分、1 m/分であった。これらの加工では上記目的には速度不足は否めず、また、工具摩耗や部品劣化が早いなどの課題が指摘されている。レーザー加工の場合、シンプルに速度向上だけを希求するのであれば、発振器の平均出力値を上げることが基本解決策となり、キロワット級の平均出力を有する大型レーザー装置を使うことで、数 m/分に達する加工速度を得ることができる。克服すべき技術課題として、加工時における熱損傷領域の発生を抑制することが重要ポイントとして存在する。

炭素繊維は5～10ミクロン直径の高耐熱性かつ高伝熱

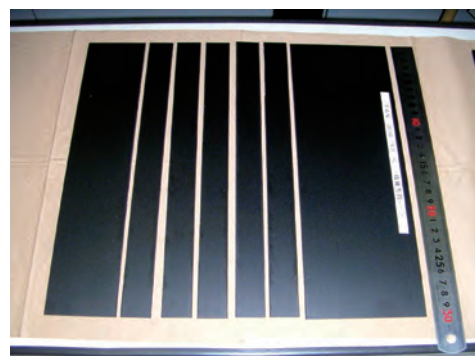


図3 30 cm角CFRP基板へのレーザー切断加工



性の繊維材料であり、樹脂は対照的に低耐熱性・低伝熱性のマトリックス材料である。CFRPは両材料を複合化（積層化）した構造なので、高出力レーザー照射時に頻発する過剰入熱が発生した場合に、樹脂部で熱損傷や層間剥離が発生しやすい傾向が認められる。特に、連続繊維型CFRP材料の場合、炭素繊維束が伝熱経路として作用するので、加工部周囲の樹脂領域に熱損傷が拡散する懸念がある。これらの熱損傷によって、繊維表面と樹脂部界面の密着度が低下すれば、構造材としての強度特性が劣化するので、加工部周囲への熱損傷拡散は極力回避する必要がある。例えば、板金材の切断加工を行う時の標準的な照射条件で炭酸ガスレーザー（800 W、20 kHz、8  $\mu$ s）を用いると、2 mm厚試料断面には1 mmを超える広範囲な領域に樹脂層の熱損傷が拡がり、不適切な条件設定であることが判明した。そこで、レーザービームの高速掃引法を導入し、加工ラインに沿って多重線および多重回照射（多重線マルチパス照射）を行うことで、3 mm厚の基板に対しても完全切断に至る照射回数を大幅に低減させるとともに、樹脂層の熱損傷についても、0.1 mm程度に抑制できていることがマイクロX線CT測定結果から判明した（図4）。国産の高出力ファイバレーザー装置開発を産学官連携の取り組みから実施し、現時点で6 m/分の加工速度を得ている（図5）。

### 3.2 樹脂表面の局所的な表面化学反応

高分子材料の表面改質は濡れ性・接着性向上を目指した研究が活発に行われており、基礎研究ならびに産業実用の広範な分野において重要な技術である。ポリアミドやポリエステル等のように炭化水素鎖を主体とする高分子材料では、[炭素-水素 (C-H)] 結合部分に水素に代わって親水基を置換させることで、親水性を発現することができる。したがって、光酸化反応が一般的な改質手段となる。高分

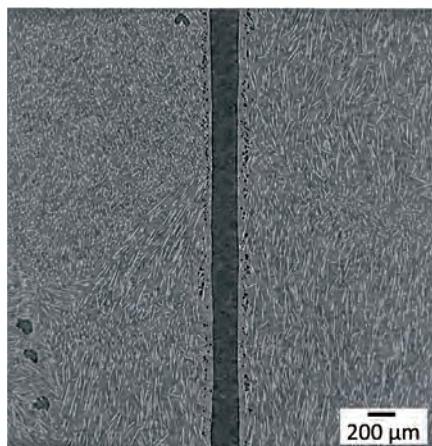


図4 レーザー加工後のCFRP試料断面のマイクロX線CT観察結果<sup>[8]</sup>

子材料親水化処理の場合のポイントは、炭素主鎖構造は破壊せずに側鎖構造部位に親水基を導入することである。仮に炭素主鎖構造を酸化反応によって切断してしまうと、分子鎖が低分子量化してしまい、溶出等が起こりやすくなり耐久性が低下する要因になる恐れがある。本項では、フッ素樹脂の表面親水化を例にレーザーを使った化学的な表面改質法を説明する。

ポリ四フッ化エチレン (PTFE) 等に代表されるフッ素樹脂は、化学的安定性や耐熱性が高い優れた材料である（図6）。しかし、表面の疎水性が非常に高いので異種材料との接着・接合性が極めて悪く、現状では金属ナトリウム有機溶液に基材を浸漬させて脱フッ素を行うことで表面を親水性に変えている。金属ナトリウム有機溶液は発火する危険性が高く、劣化が早い薬品である。また、溶液に基材を浸漬するので基材全表面を改質することになるので、安全性の高い局所的な改質も可能な新しい手法の開発が望まれていた。

フッ素樹脂の表面改質で特徴的なことは、親水性は側鎖の[炭素-フッ素 (C-F)] 結合を切断して、F原子を親水基に置換することで発現するが、C-F結合は主鎖であるC-C結合よりも結合エネルギーが大きいので、C-F結合に特異的に作用する反応系を選ばないと主鎖C-C結合の切断が起こり、ポリマー鎖の低分子量化やモノマー・ユニット脱離による表面エッチングが起きてしまうことである。前述の金属ナトリウム有機溶液では、ナトリウム原子がF原

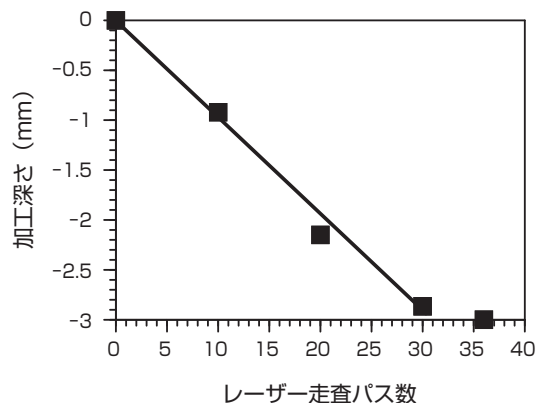


図5 多重線マルチパス照射を用いた3 mm厚CFRP基板の加工深さ  
(ビーム走査速度3.6 m/s)

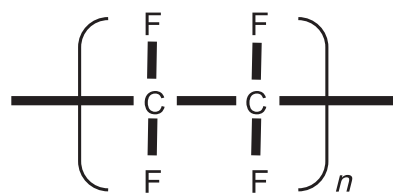


図6 PTFE化学構造

子と反応してNaFが特異的に生成することが鍵反応になっている。同様に、レーザー照射によってポリマーを直接光励起する方法では主鎖 C-C 結合の切断も起こるので、効率よく表面を親水性に代えることは困難である。したがって、図2 (b) のように反応ガスを導入し、C-F 結合に作用する反応系を用いる必要がある。ここでは、ヒドラジンをを用いた研究例を紹介する<sup>[9][11]</sup>。

ヒドラジン ( $N_2H_4$ ) 分子は紫外光照射によって、高い量子収率で分解することが知られている。光分解過程では、水素原子、ヒドラジル・ラジカル、アミノ・ラジカル等が高效率に生成する(図7)。まず水素原子がF原子と反応してHFが生成し(発熱反応)、次にF原子の脱離によって生成した炭素ラジカルと水素原子やアミノ・ラジカルが反応し、結果的に炭化水素鎖を主体とするアミノ基が部分置換している改質表面が得られる。実際の実験では図8のように、ヒドラジンを減圧した反応容器内に蒸気として導入し、ArFエキシマレーザー(波長193nm)を照射している。X線光電子分光(XPS)測定からは、レーザー処理後にフッ素シグナルが著しく低下し、代わりに窒素と酸素のピークが現れた。原子数比はC:F:N:O = 100:1.6:19:3.3で、大半のフッ素原子が表面から除去できていた<sup>[10]</sup>。水に対する接触角は $130^\circ \rightarrow 25^\circ$ と親水性表面に変化した。二次イオン質量分析結果(static SIMS; 正イオン観察)からは、レーザー処理によって炭素主鎖構造を維持したままで炭化水素鎖に変化していることが明瞭に示されている(図9)。プラ

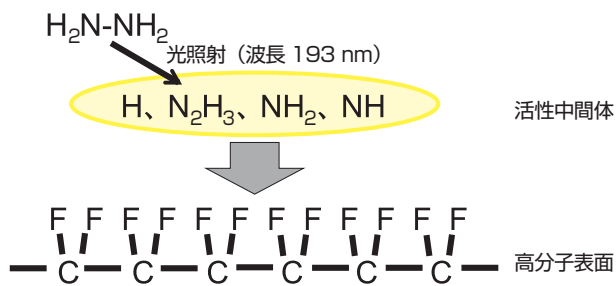


図7 反応模式図

ズマ処理によっても同様の活性種を発生させることができるが、発生濃度とパターン状処理の観点からレーザー法が優位である。

このレーザー処理基板に常法の化学めっき処理を行うと親水化部分のみにニッケルめっきが着膜し(図10)<sup>[12]</sup>、その密着性は引抜引張り試験で最大  $100 \text{ kgf/cm}^2$  を超えた<sup>[10]</sup>。シアノアクリレート系接着剤を用いて鉄棒とフッ素樹脂試料を接着したところ、同様に最高  $10 \text{ MPa}$  程度の引張強度が得られた<sup>[11]</sup>。フッ素樹脂自体の引張り強度が  $10 \text{ MPa}$  程度であることを勘案すると、改質層は母材層に堅固に密着していることになる。

### 3.3 硬脆材料の高品位微細加工

レーザー吸収が著しく小さい、もしくは、ほとんど無い基材の場合には、励起密度が小さくなるために基材への光進入長が大きくなってしまい、加工時に照射周囲にクラックやチッピング等損傷が生じてしまうため、高品位な微細加工は困難になることが多い。このような透明材料としては、可視・紫外域に吸収が無い石英ガラスやサファイヤ材料が挙げられ、これらは硬脆性材料に分類される。

ここで、紫外光をよく吸収する色素溶液を加工対象に接触させた状態で、紫外レーザーを照射し、色素溶液のアブレーションによって間接的に石英ガラス表面を微細加工するレーザー加工法を産総研が独自に開発した<sup>[13][14]</sup>。レー

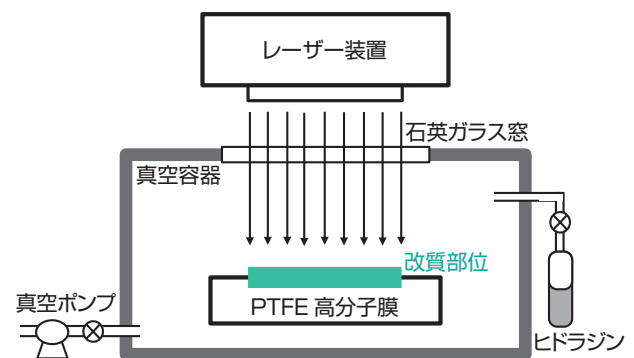


図8 実験装置図

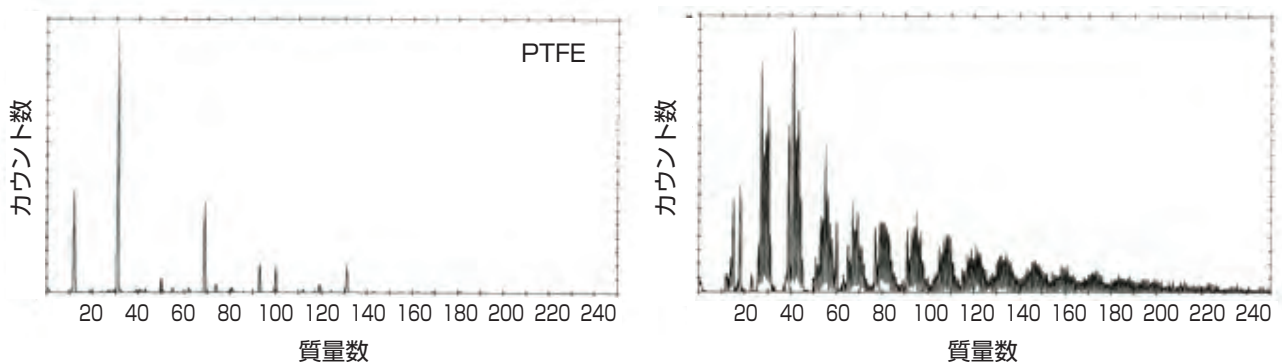


図9 ポリマー表面のSIMSスペクトル; 左図レーザー処理前、右図レーザー処理後。

レーザー誘起背面湿式加工法（LIBWE法：Laser-induced backside wet etching）は、寸法精度の高い露光マスク縮小型と、試作品が簡単にできるレーザー走査照射型の2種類である（図11）。LIBWE法では高濃度の色素溶液を用いるので、溶液層に数 $\mu\text{m}$ 程度しかレーザーは侵入できず、この薄い層内で完全に吸収される。したがって、レーザー照射によって色素分子の高密度励起状態が石英界面近傍に局所的に形成され、溶液のアブレーションが起こり、過渡的な高温・高圧状態によって石英ガラス表面層が数十nm深さでエッチングされる。重畳照射を行うことで積算パルス数に比例して加工深さが増加する<sup>[13]</sup>。他手法と比較し

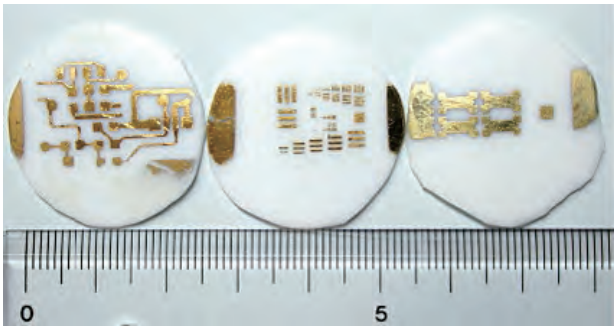


図10 PTFEへのニッケル化学めっき処理（めっき膜最表面は金置換）<sup>[12]</sup>

て、従来のリソグラフィ加工では不可欠であったフォトリソ保護膜層形成工程や除去工程、あるいは真空装置等が不要であるため、前処理や後処理が著しく簡便である。

加工表面の平坦性は高く、アブレーション時に発生する分解片の付着やクラック等の微細な加工損傷も観測されなかった。ビームホモジナイザーや露光用組レンズの導入等マスク露光縮小光学系の改良等によって、最高値として1 $\mu\text{m}$ 分解能の格子状微細加工や大型の光学素子への微細加工に成功している（図12）。

加工対象基材にアルミノ珪酸塩系ガラス（ $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ 系ガラス）を選択した時の加工結果を図13に示す。アルミノ珪酸塩系ガラスは熱膨張特性がシリコン単結晶に近く、シリコンとの歪みの少ない陽極接合が可能であることから、MEMS等の各種センサーのマイクロマシーニング接合用ガラスとしての用途が拡大している材料である。波長355nmのナノ秒パルスレーザーを用い、ピレントルエン溶液と接するガラス基板に、レーザービームをガルバノ光学スキャナで走査した。ガルバノ光学スキャナは、モータと反射ミラーによりレーザーを高速・広範囲に走査する光学装置で、図形的设计形状に沿って直接描画する方式（ベクトルモード走査）に適している。

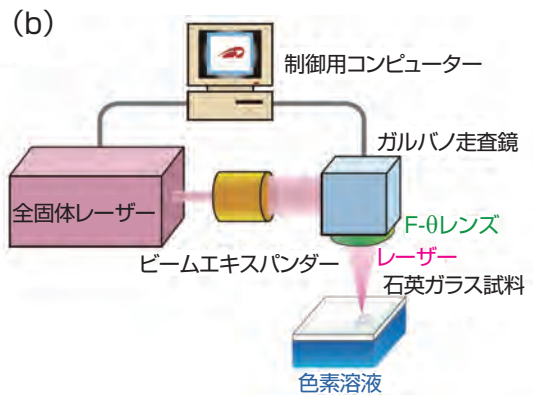
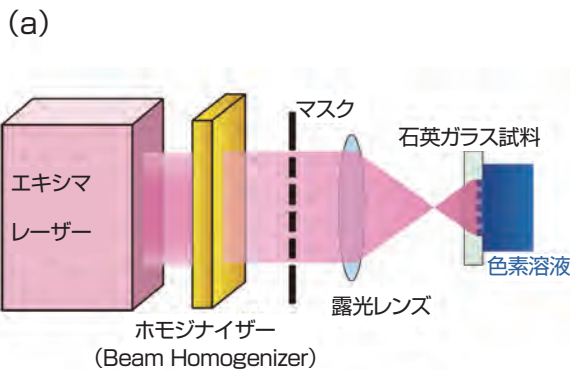


図11 LIBWE法の実験装置  
(a) エキシマレーザー露光マスク縮小型、(b) DPSSレーザー/走査鏡照射型<sup>[14]</sup>

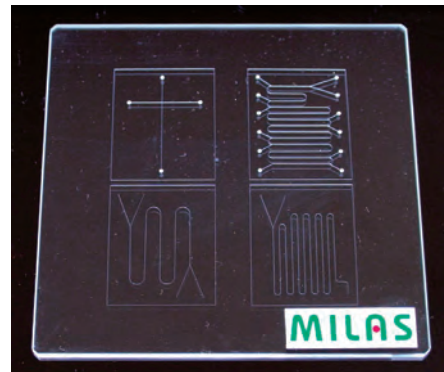


図12 石英ガラスへのLIBWE法大面積加工：レーザー走査照射型装置にて作製（左図の着色部は、透過型回折格子からの散乱光）。<sup>[14]</sup>



溝幅 20  $\mu\text{m}$  (単重線走査)、50  $\mu\text{m}$  (4 重線の集積)、80  $\mu\text{m}$  (8 重線の集積) の 3 種類について、加工パス数を増やした重畳照射によって溝深さは各々 150  $\mu\text{m}$  以上が得られた。図 13 では 1 枚のガラス基板に深さや溝幅の異なる深溝構造を形成させているが、LIBWE 加工ではこれを 1 バッチで一括作製でき、工程数を削減する上で有利な特徴を実証している。

#### 4 考察：この研究結果の意味と想定シナリオとの比較

この研究では、社会での実現を目指す研究の目標の明確化を考える際、社会背景として持続可能社会・安心安全

社会の実現を指向した軽量・高強度材料等革新的な材料開発が進む中で、これらを複合化・製品化するためには従来法を凌駕する新しい加工技術が必要とされていることが背景にある。具体的な企業側ニーズとして、多機能化、微細化、高速化等の高性能化が要求されている。したがって、この研究稿における研究目標は、レーザーを用いた材料プロセッシング技術を用いることで、製造工程と製品のグリーン化を促進させることである。

一方、この研究目標を達成するために第 3 章に示した具体的な研究事例の想定シナリオとそれを達成する道筋を図 14 に、全体図を図 15 に示す。

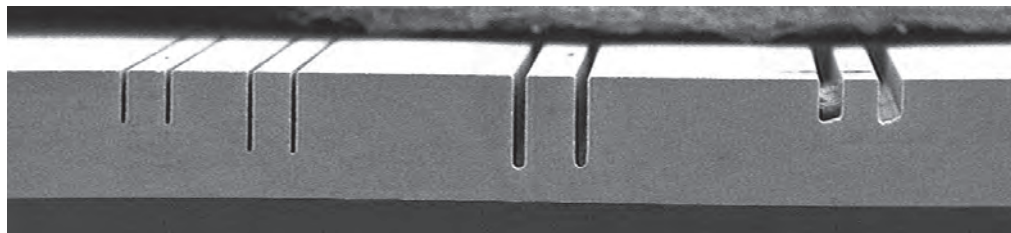


図13 アルミノ珪酸塩系ガラス基板のLIBWE法による深溝加工結果、断面構造のSEM写真 (ガラス基板厚み: 0.5 mm)。溝幅20  $\mu\text{m}$  (左)、50  $\mu\text{m}$  (中央)、80  $\mu\text{m}$  (右)

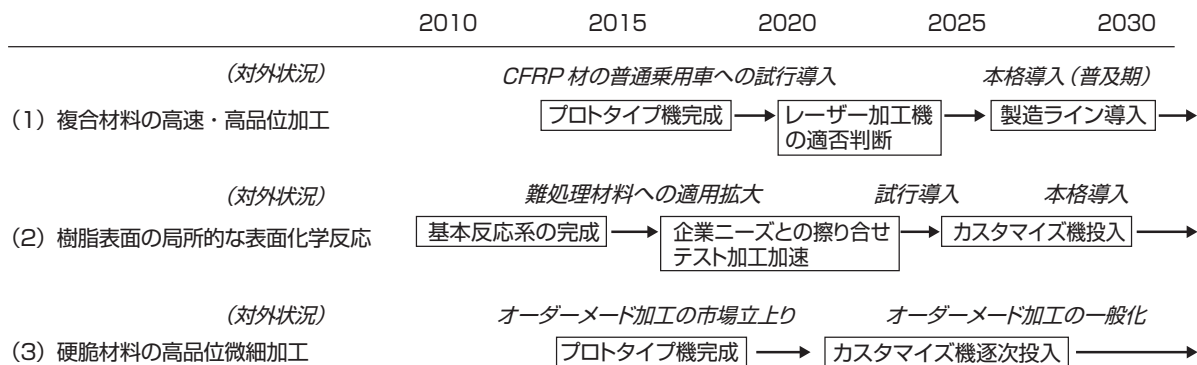


図14 第3章における具体的な研究事例の想定シナリオ

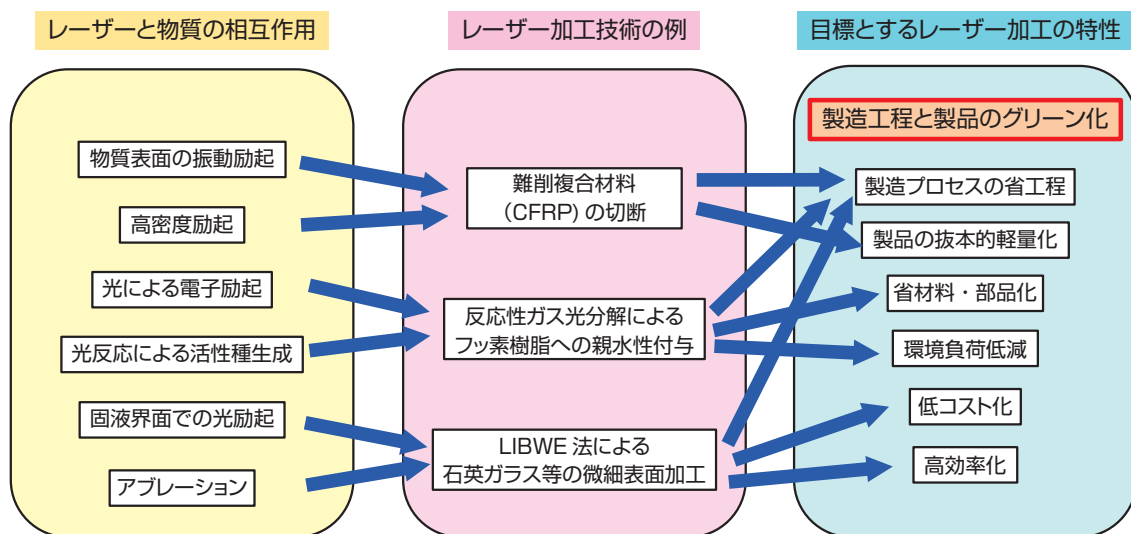


図15 第3章における具体的な研究事例の全体図

表4 第3章における具体的な研究事例の社会的なインパクト等

	社会的インパクト	予想される新しい製品群	その市場規模
複合材料加工	車体軽量化による 燃費大幅改善	超軽量化 普通自動車	2.5万トン(世界炭素繊維生産量 2020年予想) 1000万台(世界エコカー販売台 数予想 2020年)
表面化学反応	フッ素樹脂の適用 範囲拡大	電気電子用表 面改質フッ素 樹脂材	1万トン(国内フッ素樹脂販売量 2008年)
硬脆材料の 微細加工	微小光学デバイス カスタム品の短納 期化	石英板ガラス 材の精密加工 製品	2兆円(国内ガラス製品出荷量 2006年) 730億円(石英ガラスの国内出荷 量 2006年)

レーザー応用技術の成果を社会に波及させるには、加工機システムとしてプロトタイプ機をまず作製し、テストを繰り返すことで完成度の高い工作機械に仕上げていくことになる。3.1で述べたCFRP加工や3.3のガラス微細加工はプロトタイプ機が完成し、現場ニーズに即した機器性能が発揮できるかどうかの試験を進めている。装置を購入する可能性がある業界企業との密接な連携がポイントである。表4に社会的なインパクト等を整理した。想定シナリオと現在の技術レベルとのギャップは、①複合材料加工に関しては、現場生産技術との擦り合わせが、②表面化学反応に関しては、大面積処理技術の確立、使用薬品量の削減が、③硬脆材料の微細加工に関しては、カスタム品ニーズの詳細把握、が挙げられる。

一般に、レーザー加工を技術導入する事例では、多品種変量生産における生産性向上用途に最も適している。現在のレーザー加工機は、板金加工(切断、溶接)や製造時りペア技術(製造時の不良品に対して工場内でレーザー補修を行い、歩留まりを向上。液晶モニタの点欠陥修正等)に成功を収めている。

材料プロセッシングにおいて高品位特性保持と処理高速度化は相反することが多く、両者はトレードオフの関係にあることが経験的に知られるが、レーザー加工ではプロセス制御を巧みに工夫することで両特性を向上させている。第3章で紹介した具体例は、そのような難加工性材料への表面処理を材料化学の視点を加えて解決を試みたところに特徴がある。光を用いる材料プロセッシングでは、複数の要素に対して協調性を持たせながら、加工対象に作用させることができる。2014年ノーベル化学賞は、超解像度の蛍光顕微鏡の開発に対して授与された<sup>[15]</sup>。波長の異なる二つのレーザー(極小スポット光とドーナツ状パターン光)を照射すると、蛍光分子に強制的な脱励起現象が誘起されて、回折限界200 nmを突破する10 nmスケールでの顕微鏡観測が可能になる誘導放出制御(STED: Stimulated Emission Depletion)が考案されている。これは、二つの

入射光の役割を明確化し、同時照射することで、従来理論を凌駕する優れた結果を提示している。現在このSTED現象を応用する微細加工技術が基盤研究段階として試行され始めている。

レーザープロセスは他の製造技術と比較すると、装置やシステムが複雑・高価になるためにしばしばコスト高を誘引することになる。したがって、レーザーを実用的な生産・分析手段として用いる場合には市場価値に見合う経済性の確保は重要な課題である。安価な大量生産品に用いるよりは、高付加価値化が期待される特定部位への局所場処理や最適波長照射による基質選択的反応、ナノ秒からフェムト秒にわたる極短時間領域での加工過程制御がレーザー処理の特徴を最大限に発揮することができる主たる応用分野と考えられる。デジタル化したフレキシブルな生産スタイルや3D加工にも十分に対応できることから、トレーサビリティを確保する手段としても有効である。想定シナリオとのギャップを埋めるための今後の課題として、一層緊密な産学連携取り組みが挙げられる。

この研究においては、光源装置や加工システム等の基幹装置の性能に依存する要素は大きいので、試験に用いた装置で実証された成果・性能は、将来の基幹装置性能の進歩でさらに加速・向上する可能性を有する。その装置性能向上と加工プロセス高度化取り組みの協調的展開が、今後の加工技術全体の進歩の大きな鍵になることは間違いない。したがって、関係する各種技術分野の幅広い知識俯瞰力や観察力・セレンディピティも重要な要素となる。

## 5 まとめ、将来への課題

この論文で紹介した高出力レーザー装置を用いた材料加工技術を多方面に適用することにより、従来の製造工程と比較して省工程化や時間短縮化が進展する。また、難加工性材料等の高精度・高品位な微細加工の実現による新規な部材・部品・製品の提供が可能となり、製品としての省エネ特性の一層の向上が期待できる。個別要素の進歩において注目されるのが、照射光学系の回折光学素子や空間光位相変調器の発展である。光は粒子的な性質と波動的な性質の両方をあわせ持つという「光の二重性」を積極的に活用することにより、高性能分枝ビームや微細パターン化が容易に利用でき始めている。

また、加工機システムのさらなる性能向上には、我が国が有する他分野先端技術(加工データのデジタル化およびネットワーク配信技術、ロボット駆動技術)との融合によるブレークスルー型のイノベーション展開が有効で、他国と競合しながら、ものづくり技術の革新方向が示されると考える。

## 謝辞

CFRP 加工の研究は NEDO プロジェクト「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」の委託により実施した研究結果で、技術研究組合 ALPROT に所属する企業や研究機関と共同で行った成果である。また、LIBWE 法による硬脆材料の高品位微細加工は、産総研環境化学技術研究部門レーザー化学プロセスグループ（当時）のメンバーとの研究成果である。

## 参考文献

- [1] 国際光年ホームページ: 国内<http://iy12015-japan.org/>, 国際<http://www.light2015.org/Home.html>, 閲覧日2015-03-01.
- [2] レーザー学会編: レーザーハンドブック(第2版), オーム社(2005).
- [3] 次世代レーザープロセッシングとその産業応用調査専門委員会編: 最新レーザープロセッシングの基礎と産業応用, 電気学会(2007).
- [4] D. Bäuerle: *Laser Processing and Chemistry*, 4th Ed., Springer, (2011).
- [5] K.M. Davis, K. Miura, N. Sugimoto and K. Hirao: Writing waveguides in glass with a femtosecond laser, *Opt. Lett.*, 21 (21), 1729-1731 (1996).
- [6] L. Atzori, A. Iera and G. Morabito: The internet of things: a survey, *Computer Networks*, 54 (15), 2787-2805 (2010).
- [7] National Academy of Science and Engineering (April 2013): Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0, [http://www.plattform-i40.de/sites/default/files/Report\\_Industrie%204.0\\_engl\\_1.pdf](http://www.plattform-i40.de/sites/default/files/Report_Industrie%204.0_engl_1.pdf), Accessed 2015-03-01.
- [8] H. Niino, Y. Kawaguchi, T. Sato, A. Narazaki, R. Kurosaki, M. Muramatsu, Y. Harada, K. Anzai, K. Wakabayashi, T. Nagashima, Z. Kase, M. Matsushita, K. Furukawa and M. Nishino: Laser cutting of carbon fiber reinforced thermoplastic (CFRTP) by laser irradiation, *JLMN*, 9 (2), 180-186 (2014).
- [9] H. Niino and A. Yabe: Surface modification and metallization of fluorocarbon polymers by excimer laser processing, *Appl. Phys. Lett.*, 63 (23), 3527 (1993).
- [10] H. Niino and A. Yabe: Chemical surface modification of fluorocarbon polymers by excimer laser processing, *Appl. Surf. Sci.*, 96-98, 550-557 (1996).
- [11] H. Niino, H. Okano, K. Inui and A. Yabe: Surface modification of poly(tetrafluoroethylene) by excimer laser processing, *Appl. Surf. Sci.*, 109-110, 259-263 (1997).
- [12] 新納弘之: 紫外レーザーを用いたテフロン表面の改質方法および化学めっき方法, *産総研Today*, 3 (12), 26 (2003).
- [13] J. Wang, H. Niino and A. Yabe: One-step microfabrication of fused silica by laser ablation of an organic solution, *Appl. Phys. A*, 68 (1), 111-113 (1999).
- [14] 新納弘之, 佐藤正健ほか: 自由自在なレーザー微細加工の実現に向けて, *産総研Today*, 5 (10), 10-13 (2005).
- [15] S.W. Hell and J. Wichmann: Breaking the diffraction resolution limit by stimulated emission: stimulated-emission-depletion fluorescence microscopy, *Opt. Lett.*, 19 (11), 780-782 (1994).

## 執筆者略歴

新納 弘之 (にいの ひろゆき)

1986年九州大学工学部応用化学科卒業、博士(工学)、1987年工業技術院化学技術研究所研究員。2015年産総研機能化学研究部門首席研究員、現在に至る。専門：高出力レーザー微細加工およびレーザー化学。



## 査読者との議論

### 議論1 全体

コメント(小林 直人: 早稲田大学研究戦略センター)

この論文は著者が長年にわたって研究開発を行ってきたレーザーを使用した物質・材料表面の高精度・高品質加工技術に関して、著者自身が開発した技術を例示してその特質や有用性を述べたものであり、「レーザープロセッシング技術」を体系的に記述する試みという意味で、シンセシオロジーに相応しい論文と言えましょう。また、その技術的内容は高い水準のものであります。しかし初稿では、技術の解説記事的な色彩が強くなり、まだ「構成学」的な論述としては不十分だと思われましたので、質問・コメントを参考に論述の追加を依頼した結果、分かりやすい論文になったと思います。

コメント(村山 宣光: 産業技術総合研究所)

この研究は、レーザー加工技術と他の技術とを組み合わせることにより、レーザー加工の新たな応用を目指す構成学的な取り組みであり、シンセシオロジー論文に相応しい研究と考えられます。

### 議論2 研究目標と論文題目について

コメント(小林 直人)

初稿での論文題目が「高速・高品位レーザープロセッシング技術の開発」となっています。これでは一般的な技術開発の解説という印象があります。シンセシオロジー(構成学)では、まず社会での実現を目指す研究の目標を述べ、そのためのシナリオとそれを達成する道筋、要素技術の選択と統合(構成)を述べるのが求められます。研究目標としては、①どのような機能を持った材料の表面加工するための研究開発なのか、あるいは②どのような特徴を有する加工技術の開発なのかを明らかにする必要があります。またそれとともに論文題目も具体的に読者を魅了する題目にすることが望まれますので、検討を期待します。

回答(新納 弘之)

ご指摘誠にありがとうございます。パワーレーザー装置を用いた材料プロセッシング技術を構成学に照らして、具体的に、かつ、より深く考察するように改めました。この論文主題における構成学の第一の要素では、軽量・高強度材料や生体適合性材料等革新的な材料開発が進む中で、これらを複合化・製品化するためには従来法を凌駕する新しい加工技術が必要とされている背景があります。より具体的な企業側ニーズとして、多機能化、微細化、高速化等の高性能化要求が年々増大している状況下にあるため、レーザー等の光を用いた材料プロセッシング技術を用いることで、過去～現在までの時間展開が示すこの技術固有の技術高度化を継続的に推進することで、「製造工程と製品のグリーン化を促進させること」をこの論文における研究目標として明確化しました。構成学の第二の要素では、個別事例における具体的な研究目標の明確化を行い、シナリオとそれを達成する道筋を記述しました。また、第三の要素では要素技術の選択と統合の考察を行います。しかし、該研究分野における着実・堅実なリアモデル型の常法的な展開に加えて他分野技術の融合や合流を図ることでの発展経緯も併せて適時記述いたしました。さらに題目は、「製造



工程と製品のグリーン化を実現するためのレーザーを用いた材料プロセッシング技術の開発（英文：Green Photonics for Manufacturing and Products by Laser Materials Processing）」に変更しました。元の題目から削除した高速および高品位については、個々の事例に具体的な特性データを加えることで詳しく説明し、意図が明確になるように改訂しました。

### 議論3 全体の技術構成について

コメント（小林 直人）

この論文では、高速・高品位なレーザープロセッシング技術により何を実現したいのかという目標、そのためのシナリオ、要素技術の統合、などの提示をするとういと思います。具体的には技術の全体図を示して、その内容を詳しく説明すると著者の意図が十分伝わるとおもいます。

コメント（村山 宣光）

3つの研究事例で、それぞれレーザー技術とどのような技術とを組み合わせたかを図表で整理して、より明示的に表現してください。

回答（新納 弘之）

全体概念の明確化を図るために、第4章においてこの論文主題における構成学の3つの要素を具体的にこの論文に記述するとともに、図15として全体図を付与して考察しました。ここでは第3章に示した3つの研究事例（難削複合材料、反応性ガス光分解、LIBWE法）を中心に、それらに必要な要素としての「レーザーと物質の相互作用」（表面振動励起、高密度励起、光による電子励起、等）を示し、さらにそれらの研究事例によってもたらされるレーザー加工の特性、特に製造工程と製品のグリーン化の例を示しました。

### 議論4 新しい応用について

コメント（村山 宣光）

レーザー加工の新しい応用として、(1) 複合材料の高速・高品位加工、(2) 樹脂表面の局所的な表面化学反応、(3) 硬脆材料の高品位微細加工の想定シナリオをもう少し充実させてください。これらの3つの新しい応用の社会的インパクト、新しい製品群とその市場規模を記載してください。また、シナリオに時間軸を入れてください。さらにこの想定シナリオと現在の技術とのギャップとそのギャップを埋めるための今後の課題をもう少し詳しく記載してください。また、この内容を図表で整理されるとよりわかりやすくなると思います

回答（新納 弘之）

第4章において、構成学の第二要素である、個別事例における具体的な研究目標の明確化を行い、想定シナリオとそれを達成する道筋ついて、時間軸を加えて記述しました。また、想定シナリオと現在の技術とのギャップを列記し、そのギャップを埋めるための今後の課題を記載いたしました（図14）。具体的には、(1) 複合材料の高速・高品位加工では、2015年くらいにプロトタイプが完成し、2020以降にレーザー加工機の適否判断が行われ、2025年から2030年かけて製造ライン導入というシナリオが想定されます。さらに、それらの社会的インパクト、予想される新しい製品群とその市場規模を記載しました（表4）。例えば、複合材料加工の社会的インパクトとしては「車体軽量化による燃費大幅改善」が想定され、予想される製品群としては、「超軽量化普通自動車」、その市場規模として「2.5万トン（世界炭素繊維生産量2020年予想）、1000万台（世界エコカー販売台数予想2020年）」等が想定されます。

### 議論5 実用上の課題について

質問（小林 直人）

この論文に詳しく述べられているようにレーザープロセッシングには多くの長所があると考えられます。具体的には、この論文に見られるように薄型テレビや太陽電池の製造工程等に一部利用されているよ

うですが、まだまだ普及は遅いようです。最大のネックはコストであると思われませんが、この論文で示されたCFRP加工やガラス微細加工等を含めて、どのような課題を克服して行けば実用化（あるいは事業化）に至ると考えられますか。

回答（新納 弘之）

実用化に向けた課題として、加工機装置の低価格化、低消費電力性、堅牢性、信頼性等の性能向上が重要です。また、加工機装置を使用する側からの観点では、多品種適量生産に自由度高く適合できる高度にフレキシブルな生産体制のコアシステムに使用できることが鍵になります。したがって、加工機装置のハード部もカスタマイズが可能であり、操作・ソフト部も顧客が用途に応じて自由に可変できる範囲が広いことが望ましいです。マクロ加工分野であるキロワット級の炭酸ガスレーザーやファイバレーザーを搭載する板金加工用途の加工機装置は世界数社での寡占が進み、装置性能もこれらのニーズを満たす製品が適時投入されています。世界の加工機市場は年間1兆円規模で、マクロ加工分野はその6割です。一方、マイクロ加工分野は全世界で数百社のメーカーが存在し、群雄割拠の状態です。個々の実用化事例は、レーザーの特性を最大限にまで生かした工夫がなされていますが、相対的な市場規模の小ささが企業での事業展開を維持拡大していく上での大きな課題です。半導体リソグラフィ工程におけるエキシマレーザー露光装置のように、露光技術の進展状況に従い装置性能を着実かつ納期遅れなく向上させることに成功すれば、レーザーの中で最も装置単価の高価な商品として市場の信頼を得ることができます。

### 議論6 将来動向について

質問（小林 直人）

この論文にIoTやIndustry4.0の例が挙げられていますが、レーザープロセッシングはICT（情報通信技術）による制御が他の加工方法に比べて容易だと思いますので、将来的には遠隔加工も含めてICTとの融合が極めて重要になるとおもいます。現状の3Dプリンターの例なども踏まえ、ICT化を含むレーザープロセッシングの将来動向について、ご意見をお聞かせ頂けると有難いです。

回答（新納 弘之）

ご指摘の通り、レーザーが搭載された工作機械ではICTによる遠隔制御を可能とする製品が開発中です。IoTやIndustry4.0が提唱している概念自体は我が国においてもすでに検討がなされて、実際の工作機械システムにすでに搭載されている機能もあります。ただし、これらIoTやIndustry4.0は機械システムの性能を向上させるだけでなく、発注側と受注側の関係を刷新する新しいビジネスモデルの構築につながると予想されています。また、個別に各地に分散していた製造拠点が全世界的に情報一体化することから、地球規模での社会・環境問題解決の糸口になることが期待されています。

例えば、現状の3Dプリンターの性能ではメートル級の大規模成型品を造形するには日～週単位での作業時間が必要です。このため、人が常に機械を監視し続けることには無理があります。今後、装置の信頼性や制御性が向上し、遠隔制御に十分耐えられる性能段階になった時に、競合他社との差別化、工場立地の地理条件、技術者の勤務・雇用形態に至る、会社の組織形態まで影響を及ぼす可能性があることが指摘されています。

### 議論7 国際競争について

質問（村山 宣光）

レーザー加工技術に関する研究開発は、日本と比べてドイツが先行していると聞いています。その背景と現状および今後の日本の進むべき道を教えてください。

回答（新納 弘之）

レーザー加工技術の研究開発に関して、ドイツが我が国に先行し

ているのご指摘についてその背景には、①ドイツでは1980年代後半から該分野の大規模国家プロジェクトを切れ目なく継続的に推進してきたこと、②量産型乗用車製造ラインへのレーザー加工技術（特に車体の金属溶接）の積極採用がドイツ企業は突出して早期に行われたことが挙げられ、マクロ加工分野でのドイツの先行傾向は顕著です。また、光学の学問黎明期におけるドイツ人科学者の大きな貢献を出発点として今日に至っている経緯にも起因すると言えます。

日本では製造産業用の炭酸ガスレーザー装置の開発（プロジェクト期間：1977～84年）ならびにエキシマレーザー装置の開発（1986～94年）を基盤として、板金加工装置や半導体リソグラフィ装置は世界有数のシェアを現在も維持しています。しかし、平均出力キロワット級のファイバレーザー装置の開発ではやや出遅れてしまったことから、現時点における産業見本市（展示会）での最新型レーザー加工機の機器展示ではファイバレーザー国産機のプレゼンスは高いとは言えない状況です。

レーザー加工技術は広範な材料系に適用できるとともに、さまざまな応用分野が存在することを特徴としますので、多種多様な研究開発が世界各国で推進されており、欧州ならびに北米各国に加えて日本の研究開発が世界トップグループを形成しています。

今後の展開方策として、産業用途の光源開発では、現状性能から

1桁ないし2桁の大出力化を目標とした、1.キロワット級のピコ秒・フェムト秒レーザー、2.ファイバー導光型の半導体レーザー（狭小コア径での高出力光導光）、3.深紫外域半導体レーザー（超小型サイズ装置の窒化ガリウム系等）の3つが有力な課題候補と考えます。順位は実現可能性の高さに相当し、いずれも我が国にコア技術が存在します。さらに、我が国では光分野の高レベルな基礎学術的な研究が数多く行われているので、これらのフロンティア研究の成果から次世代産業応用の核になる技術の抽出と発展を迅速に行う制度構築が必要です。個々の開発テーマに適應した事業規模・体制・期間の柔軟な設定、ならびに、シナリオ・ドリブンな個別テーマ間での連携推進が有効と考えます。レーザー加工機システムは2.2節で説明しましたように多種類のハイテク技術の集積体であり、現時点ではIT技術との融合も促進されつつあります。時系列に沿ってどの技術要素を重点的に何時開発するのかを見極めることで、市場規模拡大を率先して主導することがポイントです。したがって、技術の多層構造の結節部位に空白を生じさせないことや層間の親和性向上が重要となります。

これまでのレーザー加工技術では、光の粒子性を活用した応用事例が多数を占めてきました。今後は光の波動性も併用するなどの光の性質を最大限駆使した新しい産業応用技術が発展するべきと考えています。